

势垒可调的氧化镓肖特基二极管

汪海波 万丽娟 樊敏 杨金 鲁世斌 张忠祥

Barrier-tunable gallium oxide Schottky diode

Wang Hai-Bo Wan Li-Juan Fan Min Yang Jin Lu Shi-Bin Zhang Zhong-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 037301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211536

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211536>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于机械剥离 β -Ga₂O₃ 的 Ni/Au 垂直结构肖特基器件的温度特性

Temperature dependent characteristics of Ni/Au vertical Schottky diode based on mechanically exfoliated beta-Ga₂O₃ single crystal

物理学报. 2020, 69(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200424>

用于提高微波无线能量传输系统接收端能量转换效率的肖特基二极管

Ge Schottky diode for improving energy conversion efficiency of the receiver of microwave wireless power transfer

物理学报. 2020, 69(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191415>

基于晶向优化和 Sn 合金化技术的一种 2.45 G 弱能量微波无线输能用 Ge 基肖特基二极管

A Ge-based Schottky diode for 2.45 G weak energy microwave wireless energy transmission based on crystal orientation optimization and Sn alloying technology

物理学报. 2021, 70(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201674>

GaN 肖特基二极管的正向电流输运和低频噪声行为

Forward current transport and noise behavior of GaN Schottky diodes

物理学报. 2021, 70(8): 087201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201467>

Ni/Au/n-GaN 肖特基二极管可导位错的电学模型

Physical model of conductive dislocations in GaN Schottky diodes

物理学报. 2018, 67(17): 177202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180762>

具有石墨烯/钢铋氧化物复合透明电极的 GaN 发光二极管

GaN-based light emitting diode with graphene/indium antimony oxide composite transparent electrode

物理学报. 2019, 68(24): 247303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190983>

势垒可调的氧化镓肖特基二极管*

汪海波^{1)2)†} 万丽娟¹⁾²⁾ 樊敏¹⁾ 杨金¹⁾²⁾ 鲁世斌¹⁾²⁾ 张忠祥¹⁾²⁾

1) (合肥师范学院电子信息与电气工程系, 合肥 230601)

2) (电子信息系统仿真与设计安徽省重点实验室, 合肥 230601)

(2021 年 8 月 22 日收到; 2021 年 10 月 19 日收到修改稿)

氧化镓作为新一代宽禁带材料, 其器件具有优越的性能. 本文仿真研究了 n^+ 高浓度外延薄层对氧化镓肖特基二极管的势垒调控. 模拟结果显示, 当 n 型氧化镓外延厚度为 5 nm、掺杂浓度为 $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 肖特基二极管纵向电流密度高达 496.88 A/cm^2 、反向击穿电压为 182.30 V、导通电阻为 $0.27 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、品质因子可达 123.09 MW/cm^2 . 进一步研究发现肖特基二极管的性能与 n^+ 外延层厚度和浓度有关, 其电流密度随 n^+ 外延层的厚度和浓度的增大而增大. 分析表明, n^+ 外延层对势垒的调控在于镜像力、串联电阻及隧穿效应综合影响, 其中镜像力和串联电阻对势垒的降低作用较小, 而高电场下隧穿效应变得十分显著, 使得热发射电流增大的同时, 隧穿电流得到大幅度提升, 从而进一步提升了氧化镓肖特基二极管的性能.

关键词: 氧化镓, 肖特基二极管, 有效势垒, 隧穿电流

PACS: 73.40.Mr, 72.10.Bg, 72.80.Jc, 65.40.gh

DOI: 10.7498/aps.71.20211536

1 引言

高效半导体功率开关器件直接促进世界范围的节能减排而受到强烈需求^[1]. 在高速铁路和 5G 的应用背景下, 硅基器件已不能满足高能量密度和高频的技术发展. 作为第三代半导体的典型材料, 如 SiC 和 GaN, 越来越成为当前社会和研究机构关注的焦点. 因为它们具有大禁带宽度 (E_g) 及高的击穿电场 (E_{BR}), 从而有望突破硅基器件的技术局限. 然而, 受晶体生长、器件制造难度和成本的影响, 这些材料的应用存在一定限制. 最近, 氧化镓 ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) 作为一种新的半导体候选材料, 已经引起了广泛关注, 它可以制造超越当前 SiC 和 GaN 技术参数的功率器件^[2]. 相比于第三代半导体, 它具有更宽的禁带和更高的击穿电压; 比其他超宽带半导体, 如 AlN 和金刚石, 则更容易制造.

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 可以采用氢化物气相外延和分子束外延等外延法, 在同质或异质衬底上制作出低导通电压、高正向电流密度和高开关速度特性的肖特基势垒二极管. Sasaki 等^[3] 在单晶上同质外延 n 型氧化镓, 使得击穿电压达到 150 V 以上; 而 Oh 等^[4] 报道了 210 V 的 Ni/ Ga_2O_3 垂直型肖特基二极管, 常温下导通电阻 (R_{on}) 为 $2582 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 品质因子 ($\text{FOM} = V_{BR}^2/R_{on}$, 其中 V_{BR} 为击穿电压) 约为 17.1 W/cm^2 , 势垒高度为 1.0—1.2 eV; Konishi 等^[5] 则报道了使用直径 200 μm 的 Au 阳极且带有场板结构的垂直型肖特基二极管, R_{on} 和 V_{BR} 分别达到了 $5.1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 1076 V, 有效势垒高度约为 1.46 eV; 而 Yang 等^[6] 在没有使用场板的情况下, 采用 Ni 作为肖特基接触电极, 制备的二极管 V_{BR} 也超过了 1000 V, 势垒高度为 0.94 eV, R_{on} 为 $6.7 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 室温下品质因子约为 154.3 W/cm^2 , 反向漏电流在 $\mu\text{A/cm}^2$ 量级; Hu 等^[7] 则使用蓝宝石

* 安徽省高校自然科学基金 (批准号: KJ2019A0714, KJ2020A0091)、电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室开放基金 (批准号: 2019ZDSYSZB02, 2020PTZD06) 和大学生创新创业教育训练计划 (批准号: 201814098030, 201914098094) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: john20140105@163.com

石衬底制备了横向的肖特基二极管. 同样采用 Ni 作为肖特基接触, 在没有场板保护的情况下, 可获得最高 1700 V 的击穿电压、0.85—0.9 V 的开关电压. Mohamed 等^[8]则使用 Au 作为肖特基接触, 构成的二极管具有 1.23 eV 的势垒高度, 在正向电压 1 V 时电流可达 10^{-3} A. Splith 等^[9]研究了 Cu 作为正向电极的肖特基二极管, 得出有效势垒高度为 1.32 eV, 反向电流在 10^{-7} A/cm² 量级, 正向开启电压为 0.6 V. He 等^[10]使用 Pt 作为正向电极制备的肖特基二极管, 整流比率可到 10^{10} , 势垒高度达到 1.39 eV, 内建电势 (V_{bi}) 为 1.07 V, R_{on} 为 12.5 m Ω ·cm², 反向饱和电流达到 10^{-16} A 量级, 正向电流在 2 V 时达到 56 A/cm².

从上述分析可以看出, 对氧化镓肖特基二极管已有了大量的研究, 制备出了性能各异、肖特基电极差异很大、功率密度和势垒电压差别也较大的各种功率管, 可以使用在多种场合. 但目前还未见针对同一种金属, 功率密度、势垒可调且具有广泛用途的二极管的报道.

本文经过设计仿真, 提出在传统的器件结构上外延一层纳米级的重掺杂氧化镓层, 通过调节纳米层的厚度和掺杂浓度, 可以在较大范围内调控肖特基二极管的势垒高度和功率密度, 采用相同的工艺实现不同要求的肖特基二极管. 最后通过理论分析了其作用机理, 为实验制备提供了依据.

2 计算方法

采用 Ni/Ga₂O₃ 肖特基二极管作为基础结构, 在厚度为 0.2 μ m、Sn 掺杂浓度为 3.6×10^{18} cm⁻³ 的 β -Ga₂O₃ 衬底上外延 0.6 μ m、Si 掺杂浓度为 2.0×10^{16} cm⁻³ 的 β -Ga₂O₃; 顶部电极用 Ni 形成肖特基接触, 底部电极用 Ti 形成欧姆接触. 在此基础上, 进一步增加一层 n 型的 β -Ga₂O₃ 薄层, 并改变其浓度、厚度, 研究器件性能的变化, 典型结构如图 1 所示. 结构中 Ni 的功函数为 5.15 eV^[11], β -Ga₂O₃ 的亲能为 4.00 eV^[12], 300 K 时的带隙为 4.80 eV^[13], N_c 在 300 K 时为 3.72×10^{18} cm⁻³, 相对介电常数为 10, 电子迁移率为 118 cm²/(V·s), 空穴的迁移率为 50 cm²/(V·s)^[14]; 其他材料参数参考 N-族宽禁带半导体的数值^[6,15]. 为了研究肖特基的接触势垒, 考虑了镜像力效应, 所有的结构网格都被精细划分, 使得最终稳态电流不随网格的变化

而变化. 基础物理模型采用肖特基接触的热电子发射理论 (thermionic emission model), 并且考虑能带变窄效应 (Bgn model)、隧穿效应 (Tsu-Esaki model)、费米统计 (Fermi-Dirac model) 以及离子碰撞模型 (Selberherr model), 隧穿效应采用 WKB (Wenzel-Kramers-Brillouin) 近似^[16,17]; 计算未考虑缺陷影响. 收敛判据使用 Newton 算法.

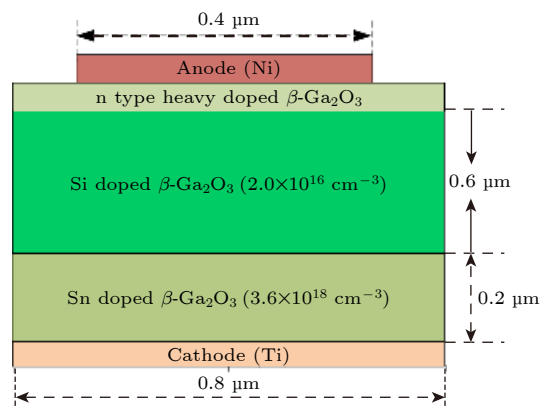


图 1 Ni/Ga₂O₃ 肖特基二极管的典型结构

Fig. 1. Typical structure of Ni/Ga₂O₃ Schottky diodes.

3 结果

图 2 所示是外延 5 nm、Si 掺杂浓度为 2.6×10^{18} cm⁻³ 的 n⁺ β -Ga₂O₃ 薄层和未加 n⁺薄层的肖特基二极管性能曲线对比. 为了解性能差异及外延层的影响, 在正向特性曲线中还同时对比了存在和不存在隧穿作用的情况, 如图 2(a) 所示. 而反向特性曲线则直接考虑隧穿电流而没有对比无隧穿的情况, 如图 2(b) 所示. 肖特基反向特性漏电流较小, 需要考虑隧穿电流, 否则结果意义不大.

由图 2 可以看出, 没有外延薄层并且不考虑隧穿电流的情况下, 肖特基二极管的开启电压约为 0.76 V, 在 0.8 V 的正向偏置下, 正向电流密度为 2.34 A/cm² (通过图 2 中 0.8 V 的电流值除以图 1 面积换算而来, 下同); 考虑隧穿电流, 开启电压为 0.75 V, 正向电流密度为 3.62 A/cm².

而相同面积的肖特基二极管外延 5 nm 的 n⁺层后, 且不考虑隧穿电流的情况下, 开启电压为 0.76 V, 正向电流密度为 14.05 A/cm²; 如果考虑隧穿效应, 开启电压仍然为 0.76 V, 正向电流密度大幅度增大到 496.88 A/cm².

大量研究结果表明, 肖特基二极管的电流方程符合热电子发射理论^[18], 可以用 (1) 式表示:

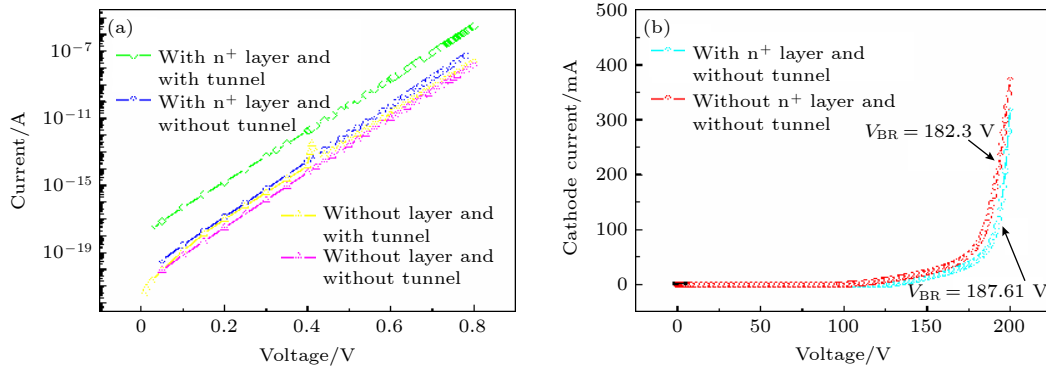


图 2 外延与未加 n^+ β -Ga₂O₃ 薄层的肖特基性能曲线对比 (外延层厚度为 5 nm、浓度为 $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) (a) 正向特性曲线; (b) 反向特性曲线

Fig. 2. Comparison of β -Ga₂O₃ Schottky diode performance with and without n^+ epitaxial layer (thickness 5 nm, concentration $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$): (a) Forward characteristic curve; (b) reverse characteristic curve.

表 1 按照热电子发射理论计算的参数

Table 1. Parameters calculated according to hot electron emission theory.

势垒高度/eV	理想因子 n	开启电压/V	$R_{on}/(\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	0.8 V 电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	击穿电压/V	类型
1.08	1.06	0.76	88.50	2.34	—	I: 无外延层+无隧穿效应
1.07	1.10	0.75	31.10	3.62	187.61	II: 无外延层+有隧穿效应
1.02	1.02	0.76	18.25	14.05	—	III: 有外延层+无隧穿效应
0.93	1.07	0.76	0.27	496.88	182.30	IV: 有外延层+有隧穿效应

$$I = I_0 \exp \left[\frac{q(u - IR_s)}{nkT} \right] \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{q(u - IR_s)}{nkT} \right] \right\} \\ \approx I_0 \exp \left[\frac{q(u - IR_s)}{nkT} \right], \quad (1)$$

其中 u 是外部电压, k 是玻尔兹曼常数, q 是单位电子电荷, n 是理想因子, R_s 是串联电阻, I_0 是饱和电流, 由 (2) 式给出:

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left(-\frac{\Phi_b}{kT} \right), \quad (2)$$

这里, A 是接触面积, A^* 是有效理查森常数 ($33.7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$), Φ_b 是有效势垒高度. 也就是说普通的肖特基二极管电流主要来源于热电子发射, 而隧穿电流、缺陷复合等电流成分较小. 按照这种假设计算上述 4 种情况的势垒高度和理想因子, 结果见表 1.

没有外延薄层且不考虑隧穿效应的情况下 (类型 I), 理想因子为 1.06, 正向导通电阻约为 $88.50 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 有效势垒高度为 1.08 eV; 考虑隧穿效应后 (类型 II), 理想因子上升为 1.10, 正向导通电阻约为 $31.10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 有效势垒高度为 1.07 eV, 对应的击穿电压为 187.61 V, 由此计算的 FOM 值为 1.13 MW/cm^2 . 实验测试的 Ni/ β -Ga₂O₃ 肖特基二极管势垒高度在 1.10 eV 左右, 对应的理想因子约

为 1.30^[4,6]. 本文中所用的 Ni 的功函数为 5.15 eV^[11], β -Ga₂O₃ 的亲合能为 4.00 eV, 考虑镜像力作用, 有效势垒高度低于 1.15 eV 是比较合理的结果; 而本文得出的理想因子明显低于文献报道的结果^[4,6], 是由于没有考虑缺陷作用, 而 0.8 V 时的电流密度也稍微小于文献^[6] 的值 ($\sim 6.09 \text{ A/cm}^2$), 导通电阻也较文献^[6] 报道结果高 ($\sim 6.7 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$), 同样是由于缺陷带来的影响. 但仍然可以从类型 I 和 II 的对比看出, 隧穿效应可以提高电流密度达 54%.

有外延层且不考虑隧穿效应时 (类型 III), 理想因子变为 1.02, 正向导通电阻约为 $18.25 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 有效势垒高度 1.02 eV; 考虑隧穿效应后 (类型 IV), 理想因子变为 1.07, 正向导通电阻约为 $0.27 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 有效势垒高度 0.93 eV, 对应的反向击穿电压为 182.30 V, 由此计算的 FOM 值高达 123.09 MW/cm^2 . 对比类型 III 和 IV 可得, 有外延薄层时, 隧穿效应可以提高电流密度达 35 倍; 对比类型 II 和 IV 可看出, 外延薄层仅仅使反向耐压降低了 5.31 V, 小于 3%. 很明显, 增大一层 n 型的 β -Ga₂O₃ 薄层能降低正向导通电阻和势垒电压, 而大幅度提升功率密度; 而外延的薄层使隧穿效应对肖特基二极管的影响更为显著, 对反向耐压影响较小.

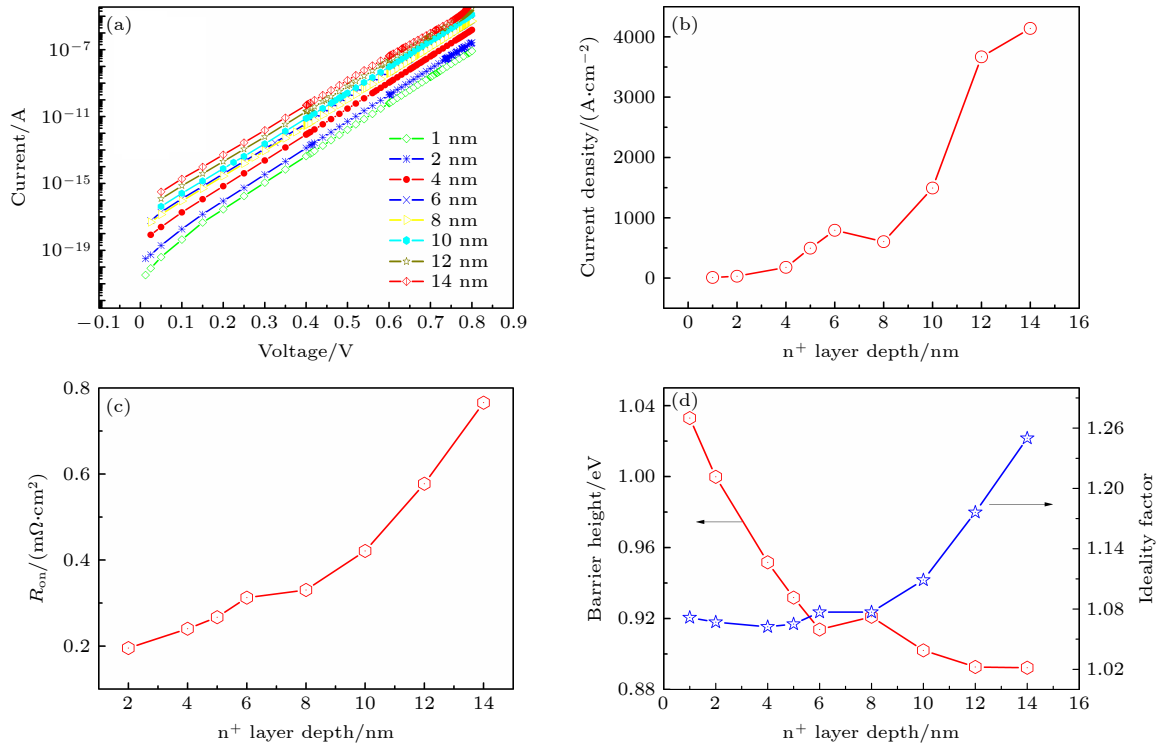


图3 考虑隧穿效应, 在 $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度下, n^+ 层厚度对正向特性的影响 (a) 正向 I - V 曲线; (b) 0.8 V 正向偏置时, 电流密度与 n^+ 层厚度的关系; (c) 导通电阻与 n^+ 层厚度的关系; (d) 有效势垒高度和理想因子与 n^+ 层厚度的关系

Fig. 3. Considering the tunnel effect, influence of n^+ layer thickness on forward characteristic with concentration $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$: (a) Forward I - V curve; (b) relationship between current density and the thickness at 0.8 V forward bias; (c) relationship between R_{on} and the thickness; (d) relationship of effective barrier height and ideal factor to the thickness.

图3显示了考虑隧穿效应时, 在 $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度下, n^+ 层厚度对正向特性及相关参数的影响。

从图3(a)可以看出, n^+ 层厚度在 1—14 nm 范围内, 相同的正向偏压下, 厚度越大电流密度越高。从图3(b)可以看出, 在 0.8 V 正向偏置下, n^+ 层厚度小于 10 nm 时, 电流密度小于 $800 \text{ A}/\text{cm}^2$, 大于 10 nm 后, 电流密度快速上升, 最终达到 $4139.78 \text{ A}/\text{cm}^2$ ($n = 14$)。同样也可以按照 (1) 式和 (2) 式计算导通电阻、势垒高度和理想因子。从图3(c) 和图3(d)可以看出, n^+ 层厚度在 1—14 nm 范围内, 导通电阻均小于 $1 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 但随着厚度的增大而增大。有效势垒高度值在 1.04—0.88 eV 之间, 并且随着厚度增大有逐渐下降的趋势; 而理想因子 n 在 1.02—1.26 之间, 随着厚度的增大逐渐升高。

此处 n 值偏离 1 越大, 表明隧穿电流作用越强。而导通电阻受到势垒层和串联电阻效应的共同影响。势垒高度随着厚度的增大而逐渐降低, 热发射电流和隧穿电流同时增大导致电流密度增大, 致使导通电阻减小。与此同时, 串联电阻随厚度的增大而逐渐增大, 但考虑到 n^+ 外延层掺杂浓度较高, 厚度从 1 nm 增大到 14 nm, 串联电阻增大非常有限。

所以可认为导通电阻主要受隧穿作用的影响。

图4显示了考虑隧穿效应时, 在 n^+ 层厚度为 5 nm 时, n^+ 层浓度变化对正向特性及相关参数的影响。

从图4(a)可看出, n^+ 层浓度在 10^{14} — 10^{19} cm^{-3} 范围内, 在相同的正向偏压下, 浓度越高电流密度越大; 从图4(b)可看出, 0.8 V 正向偏置时, 浓度在 10^{18} cm^{-3} 以内, 电流密度变化不大, 浓度超过 10^{18} cm^{-3} 后, 电流密度急速上升。按照 (1) 和 (2) 式计算导通电阻、势垒高度和理想因子。从图4(c)可看出, 在考虑隧穿效应的情况下, 总体上导通电阻随着 n^+ 外延层浓度增大而逐渐降低。当 n^+ 层浓度小于 10^{18} cm^{-3} , 电阻呈现较高的值, 当浓度超过 10^{18} cm^{-3} , 导通电阻降低到 $1 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下, 并且呈现下降趋势。有效势垒高度为 1.08—0.85 eV, 也随着厚度增大逐渐下降。当浓度低于 10^{18} cm^{-3} , 势垒高度下降并不明显; 超过 10^{18} cm^{-3} , 势垒高度快速下降; 而理想因子在 1.06—1.15 之间, 并随着厚度的增大逐渐升高。

n 值的增大很大程度上表明隧穿电流的增强。从图4(d)可以看出, n 值最终达到 1.15。表明肖特

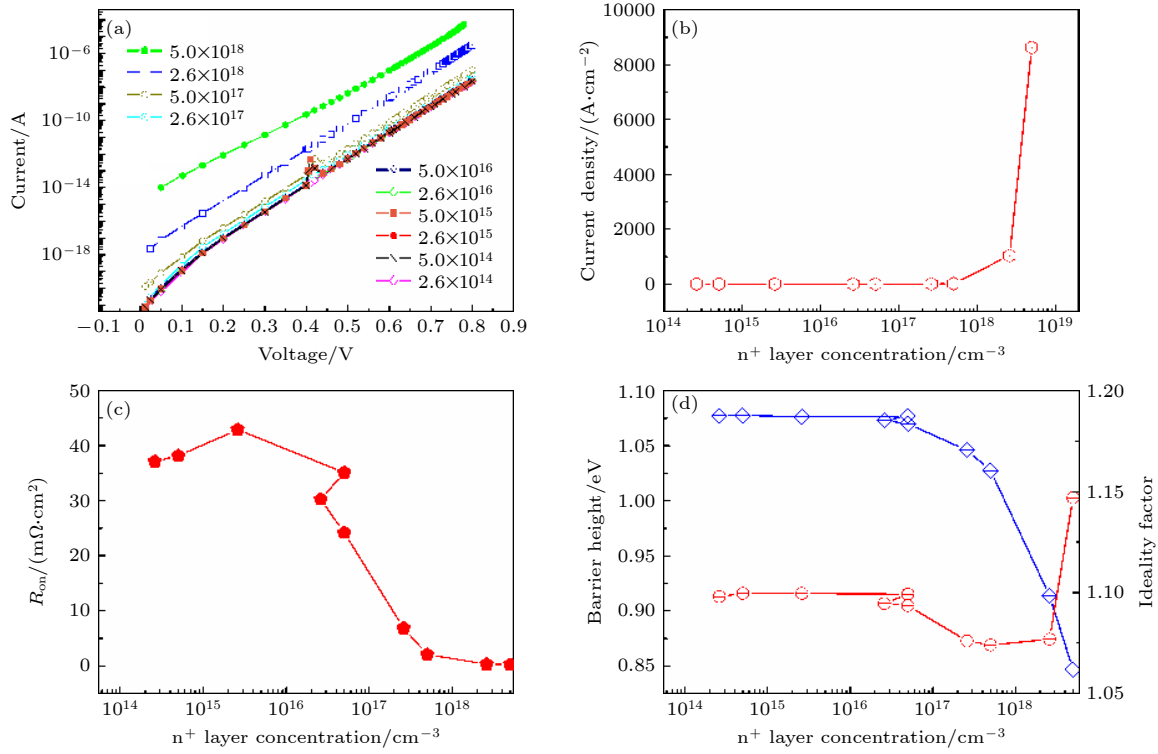


图 4 考虑隧穿效应, 在厚度为 5 nm 时, n^+ 层浓度对正向特性的影响 (a) 正向 I - V 曲线; (b) 0.8 V 正向偏置时, 电流密度与 n^+ 层浓度的关系; (c) 导通电阻与 n^+ 层浓度的关系; (d) 有效势垒高度和理想因子与 n^+ 层浓度的关系

Fig. 4. Considering the tunnel effect, the influence of n^+ layer concentration on the forward characteristic with 5 nm thickness: (a) Forward I - V curves; (b) relationship between current density and the concentration at 0.8 V forward bias; (c) relationship between R_{on} and the concentration; (d) relationship of effective barrier height and ideal factor to the concentration.

基二极管逐渐偏离了理想热发射占主导的机制. n^+ 外延层的浓度升高, 导通电阻逐渐下降, 浓度较低时, 串联电阻效应和热发射效应较弱, 电阻随着浓度降低并不明显; 随着外延层浓度进一步上升, 串联电阻效应、热发射以及隧穿效应的增强导致电阻快速下降.

4 讨论

没有外延层时, 金属-半导体接触的性能取决于有效势垒, 而有效势垒除了决定于金属和半导体的功函数差之外, 在电场的作用下, 镜像力、界面态和隧穿效应也会对势垒产生影响.

界面态对势垒的影响较为严重, 本文由于缺少界面态密度等数据, 未考虑其影响, 以至于在没有 n^+ 外延层时, 理想因子接近 1, 表明了较好的接触.

对于镜像力对势垒的影响, 可以使用 (3) 式表示 [12]:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{q\xi}{4\pi\epsilon_s}} \quad (3)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为镜像力导致的势垒降低高度, ξ 为电场的最大值, ϵ_s 为介电常数. 在没有外延层的情况下, 0.8 V 正向偏压时, 纵向电场的最大值约为 3.71×10^4 V/cm, 与仿真值相同. 计算可得 $\Delta\varphi$ 为 0.023 eV, 势垒高度约为 1.12 eV.

隧穿效应对势垒有较大的影响. 前文对比过无外延层时隧穿电流的影响 (图 2 和表 1), 发现隧穿效应会使得没有外延层的电流密度增大 54%; 对应的势垒高度降低可以用 (4) 式表示:

$$\Delta\varphi = \frac{q}{16\pi\epsilon_s x_m} + E_s x_m n \quad (4)$$

$$x_m = \sqrt{\frac{-q}{16\pi\epsilon_s E_s}}, \quad (5)$$

式中, E_s 为表面最大电场, 而 x_m 是最大电场对应的位置. 计算可得 $\Delta\varphi$ 为 0.046 eV, 势垒高度为 1.10 eV 左右. 两者相差并不明显, 电场强度也不强, 虽然隧穿效应增大了电流, 但增大有限, 表明电流的增大主要来自于热发射作用的增强.

有外延层时, 在 0.8 V 偏压下, 纵向电场的最大值约为 3.52×10^5 V/cm, 与仿真值相同. 不考虑

隧穿效应, 同样利用 (3) 式计算可得 $\Delta\varphi$ 为 0.071 eV, 明显比无外延层的情况下势垒降低显著. 热发射导致电流进一步增大; 而在有外延层的情况下, 隧穿效应变得更加剧烈, 可以使电流增大几十倍. 在有薄层的情况下, 势垒高度受隧穿影响不能直接用 (4) 式计算, 因为式中没有薄层厚度和浓度的影响.

在金属半导体之间插入重掺杂的 n 型薄层调控有效势垒高度, 形成的电场分布中, 最大值为

$$|\xi_{\max}| = \frac{q}{\varepsilon_s} [n_1 a + n_2 (W - a)], \quad (6)$$

其中, a 为薄层的厚度, W 为耗尽层宽度, n_1 为薄层浓度, n_2 为半导体外延层浓度, ε_s 为半导体材料的介电常数. 本文中外延层的掺杂浓度为 $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 而薄层的掺杂浓度为 $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 故电场强度可以简化为

$$|\xi_{\max}| = \frac{q}{\varepsilon_s} n_1 a. \quad (7)$$

对应的镜像力势垒降低可以用 (8) 式表示:

$$|\Delta\phi| = \frac{q}{\varepsilon_s} \sqrt{\frac{n_1 a}{4\pi}}. \quad (8)$$

当厚度为 5 nm 时, 计算可得所使用薄层的最大电场可达 $3.52 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 镜像力势垒降低值为 0.058 eV.

而对应的隧穿效应导致的势垒降低, 同样可根据最大电场计算得到势垒降低约为 0.124 eV, 有效势垒约为 0.967 eV. 此时电场强度超过 10^5 V/cm , 隧穿电流将变得显著, 而热发射电流由于势垒的降低而同时增大 [13].

当外延层浓度增大时, 根据 (8) 式可以看出, 势垒高度随着 \sqrt{n} 减小, 从而导致电流密度增大. 同样地, 当外延层厚度增大时, 势垒高度随着 \sqrt{a} 减小.

由以上分析可以看出, n^+ 高浓度外延层增大了半导体一侧的电场强度, 势垒高度受到镜像力、串联电阻及隧穿效应的多方面影响. 其中, 镜像力由于电场的增大而使得势垒下降得不多; 外延层的厚度同样会造成势垒高度的下降, 但下降的值也并不严重; 高电场会使得隧道作用变得显著, 其对势垒的降低作用占据了主要部分. 因此, n^+ 薄层导致电流密度大幅度上升和导通电阻的急剧下降, 是由于势垒降低导致的热发射电流的增大, 更为重要的是半导体一侧电场强度的增大导致隧穿电流的增大. 可以确信隧穿作用远远大于热发射作用, 对势垒的调控也主要是由于隧穿作用.

5 结 论

本文研究了 n^+ 高浓度外延层对氧化镓肖特基二极管的势垒调控. 结果发现, 外延一定厚度和浓度的 n 型氧化镓薄层后, 性能相较于普通氧化镓二极管得到大幅度提升. 其中纵向电流密度每平方米可高达几百安, 导通电阻降低到 $1 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下, FOM 值达到 100 MW/cm^2 以上. 理论分析表明, 性能的提升主要是由于 n^+ 高浓度外延薄层对肖特基接触的势垒调控. 势垒调控在于外延薄层对镜像力、外延层本身和隧穿效应的综合影响, 其中隧穿效应影响最大. 当外延薄层浓度增大时, 势垒高度随着 \sqrt{n} 减小; 当外延薄层厚度增大时, 势垒高度随着 \sqrt{a} 减小. 最终导致氧化镓肖特基二极管在热发射的基础上, 大幅度增大了电流密度, 从而降低了导通电阻、增大了 FOM 值.

参考文献

- [1] Singh M, Casbon M A, Uren M J, et al. 2018 *IEEE Electron Device Lett.* **10** 1572
- [2] Baliga B J 2008 *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* (New York: Springer Press)
- [3] Sasaki K, Kuramata A, Masui T, Villora E G, Shimamura K, Yamakoshi S 2012 *Appl. Phys. Express* **5** 035502
- [4] Oh S, Yang G, Kim J 2017 *ECS J. Solid State Sci.* **6** Q3022
- [5] Konishi K, Goto K, Murakami H, et al. 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 103506
- [6] Yang J, Ahn S, Ren F, Pearton S J, Kuramata A 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 030101
- [7] Hu Z, Hong Z, Dang K, Cai Y, Yue H 2018 *IEEE J. Electron Dev.* **6** 1
- [8] Mohamed M, Irmscher K, Janowitz C, Galazka Z, Manzke R, Fornari R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 132106
- [9] Splith D, Müller S, Schmidt F, et al. 2014 *Phys. Status Solidi A* **211** 40
- [10] He Q, Mu W, Dong H, Long S, Jia Z, Lv H, Liu Q, Tang M, Tao X, Liu M 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 093503
- [11] Hlzl J, Schulte F K 1979 *Springer Tr. Mod. Phys.* **85** 1
- [12] Irmscher K, Galazka Z, Pietsch M, Uecker R, Fornari R 2011 *J. Appl. Phys.* **110** A316
- [13] Mohamed M, Janowitz C, Unger I, et al. 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081906
- [14] Rubio A, Corkill J L, Cohen M L, Shirley E L, Louie S G 1993 *Phys. Rev. B* **48** 11810
- [15] He H, Blanco M A, Pandey R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 261904
- [16] Cheng T, Jie S, Na L, Jia Z, Mu W, Tao X, Xian Z 2016 *Rsc Adv.* **6** 78322
- [17] Tang X Y, Zhang Y M, Zhang Y M, Guo H, Zhang L 2006 *J. Semicond.* **27** 174 (in Chinese) [汤晓燕, 张义门, 张玉明, 郭辉, 张林 2006 半导体学报 **27** 174]
- [18] Chabak K D, Moser N, Green A J, Walker D E, Jessen. G 2018 *Appl. Phys. Lett.* **109** 213501

Barrier-tunable gallium oxide Schottky diode^{*}Wang Hai-Bo^{1)2)†} Wan Li-Juan¹⁾²⁾ Fan Min¹⁾ Yang Jin¹⁾²⁾Lu Shi-Bin¹⁾²⁾ Zhang Zhong-Xiang¹⁾²⁾¹⁾ (*Department of Electronic Information and Electrical Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China*)²⁾ (*Anhui Province Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System, Hefei 230601, China*)

(Received 22 August 2021; revised manuscript received 19 October 2021)

Abstract

Gallium oxide is a new generation of wide band gap materials, and its device has excellent performance. The barrier control of Ga_2O_3 Schottky diode by n^+ high concentration epitaxial thin layer is studied. The results show that the performance of Schottky diode has greatly improved after epitaxy of n-type gallium oxide. The vertical current density is $496.88\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, the reverse breakdown voltage is 182.30 V, and the calculated R_{on} is $0.27\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ when the epitaxial concentration is $2.6 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ and the thickness is 5 nm. Further studies indicate that the current density increases with the increase of the layer thickness and the concentration. Theoretical analysis shows that the barrier is controlled by mirror force, series resistance and tunnel effect. Of them, the tunnel effect has the greatest influence, which makes the barrier height decrease with the layer concentration as \sqrt{n} and the thickness as \sqrt{a} . As a result, the hot emission current and the tunnel current increase simultaneously, which improves the performance of Ga_2O_3 Schottky diode.

Keywords: gallium oxide, schottky diode, effective barrier, tunnel current**PACS:** 73.40.Mr, 72.10.Bg, 72.80.Jc, 65.40.gh**DOI:** 10.7498/aps.71.20211536

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Colleges in Anhui Province, China (Grant Nos. KJ2019A0714, KJ2020A0091), the Open Fund Project of Key Laboratory of Anhui Province for Electronic Information System Simulation and Design, China (Grant Nos. 2019ZDSYSZB02, 2020PTZD06), and the Innovation and Entrepreneurship Education and Training Program for College Students in Anhui Province, China (Grant Nos. 201814098030, 201914098094).

[†] Corresponding author. E-mail: john20140105@163.com